

# ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЛАВИННО-ПРОЛЁТНЫХ ДИОДОВ НА ГЕТЕРОПЕРЕХОДЕ ГЕРМАНИЙ-АРСЕНИД ГАЛЛИЯ

К. М. ДАТИЕВ\*

Факультет электронной техники, Северо-Кавказский политехнический институт г. Орджоникидзе (СССР)

(Поступило в Редакцию 1 сентября 1977 г.)

Проведен расчёт мощности генерации лавинно-пролётного диода (ЛПД) на гетеропереходе германий-арсенид галлия с однородным распределением электрического поля в слое умножения. Полученные данные позволяют определить необходимый набор параметров ЛПД и гетероперехода германий-арсенид галлия, обеспечивающий требуемые к. п. д. (мощность генерации) и оптимальную нагрузку.

В ранее опубликованных работах [1—3] были определены статические параметры двухслойной структуры запирающего слоя на основе гетероперехода Ge—GaAs для создания высокоэффективных ЛПД. В работе [4] рассмотрена взаимосвязь предельной мощности генерации ЛПД на гетеропереходе Ge—GaAs, характеризующийся линейным распределением электрического поля в слое умножения, с параметрами режима и структуры. Результаты указанных работ позволяют определить необходимый набор параметров ЛПД и двухслойной структуры запирающего слоя на основе гетероперехода Ge—GaAs, обеспечивающий требуемые к. п. д. или мощность генерации и оптимальную нагрузку.

Настоящая работа посвящена решению задачи о взаимосвязи максимальной мощности генерации ЛПД на гетеропереходе Ge—GaAs с однородным распределением электрического поля в слое умножения и параметрами режима и структуры. На рис. 1 представлена схема рассматриваемой модели ЛПД на гетеропереходе  $(p^+ - p)\text{Ge} - (n - n^+)\text{GaAs}$ , распределение атомов примесей и электрического поля в запирающем слое. Такая структура описывается в общем случае шестью параметрами: концентрациями примесей  $N_1$  и  $N_2$  и толщинами  $\delta_1$  и  $\delta_2$  высокоомных слоёв германия и арсенида галлия соответственно и концентрациями  $N_3$  и  $N_4$  в низкоомных частях Ge и GaAs.

При анализе предполагается, что переходы резкие, а высокоомные слои легированы однородно. Также предполагается, что степени легирования  $p^+$  и  $n^+$  областей много больше, чем уровни легирования  $p$  и  $n$  слоёв и, следовательно, падением напряжения и умножением в низкоомных слоях германия и арсенида галлия можно пренебречь.

В общем случае границы области запирающего слоя  $X_1$  и  $X_2$  в режиме лавинного пробоя могут быть меньше толщин высокоомных слоёв  $\delta_1$  и  $\delta_2$  соответственно. При этом такая структура ЛПД, анализ которой проведен в работе [4],

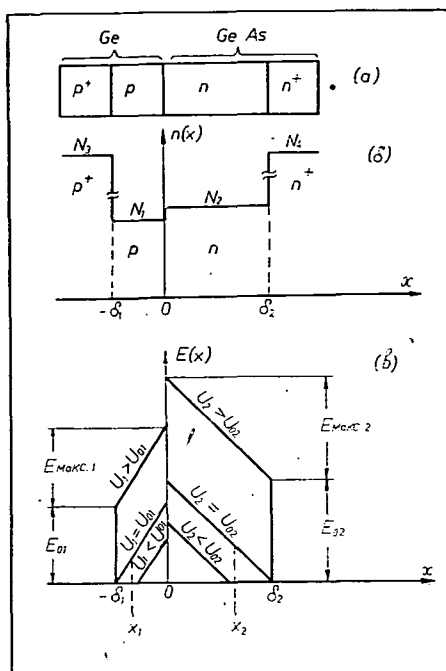


Рис. 1. Схема модели ЛПД на гетеропереходе  $(p^+-p)\text{Ge}-(n-n^+)\text{GaAs}$ : (а) структура диода; (б) распределение атомов примесей; (в) распределение электрического поля.

имеет линейное распределение электрического поля в области запирающего слоя.

В данной работе рассматривается структура, в которой толщины высокоомных слоёв  $p$  и  $n$  областей гетероперехода настолько малы, что до лавинного пробоя наступает режим ограниченного расширения областей запирающего слоя по обе стороны от границы раздела. Такая структура характеризуется тем, что области запирающего слоя в  $p$  и  $n$  частях перехода с ростом обратного напряжения достигают соответственно  $p^+$  и  $n^+$  слоёв. Очевидно, что при дальнейшем увеличении модуля обратного напряжения ширина области запирающего слоя не будет возрастать, а ёмкость перехода становится постоянной. Можно показать, что указанный режим будет иметь место при напряжениях  $U \geq U_0$ , составляющие которого  $U_{01}$  и  $U_{02}$  определяются в виде [2]

$$U_{01} = qN_1\delta_1^2/2\varepsilon_0\varepsilon_1 - \varphi_{K1}, \quad (1)$$

$$U_{02} = qN_2\delta_2^2/2\varepsilon_0\varepsilon_2 - \varphi_{K2}, \quad (2)$$

где  $\varphi_{K1}$  и  $\varphi_{K2}$  — составляющие контактной разности потенциалов в 1 и 2 материалах соответственно (здесь и далее: индекс 1 — германий, 2 — арсенид галлия).

Распределение электрического поля для рассматриваемой структуры будет иметь вид:

а) в  $p$ -области запирающего слоя при  $-\delta_1 \leq x \leq 0$

$$E_1(x) = E_{\text{макс.1}} \left(1 + \frac{x}{\delta_1}\right) + E_{01}, \quad (3)$$

где

$$E_{\text{макс.1}} = qN_1\delta_1/\varepsilon_0\varepsilon_1, \quad (4)$$

$$E_{01} = U_1/\delta_1 - E_{\text{макс.1}}/2, \quad (5)$$

$$U_1 = \int_{-\delta_1}^0 E_1(x) dx - \varphi_{K1}, \quad (6)$$

б) в  $n$ -области запирающего слоя при  $0 \leq x \leq \delta_2$

$$E_2(x) = E_{\text{макс.2}} \left(1 - \frac{x}{\delta_2}\right) + E_{02}, \quad (7)$$

где

$$E_{\text{макс. 2}} = qN_2\delta_2/\epsilon_0\epsilon_2, \quad (8)$$

$$E_{02} = U_2/\delta_2 - E_{\text{макс. 2}}/2, \quad (9)$$

$$U_2 = \int_0^{\delta_2} E_2(x) dx - \varphi_{K2}, \quad (10)$$

$q$  — заряд электрона;  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  — относительные проницаемости материалов;  $U = U_1 + U_2$  — приложенное напряжение и его составляющие.

В работе [2] было показано, что при лавинном пробое гетеропереходов Ge—GaAs с глубокой степенью ограничения области запирающего слоя  $E_{01} \gg E_{\text{макс. 1}}$  и  $E_{02} \gg E_{\text{макс. 2}}$  и, следовательно, распределение электрического поля в области запирающего слоя можно считать достаточно однородным.

При анализе использовалась модель эквивалентного слоя умножения (ЭСУ) [5]. Эквивалентная схема запирающего слоя ЛПД и векторная диаграмма токов в этом слое приведены на рис. 2, где  $C$  — ёмкость запирающего слоя гетероперехода;  $I_{\text{ср. пр.}}$  — генератор среднего тока проводимости;  $E$  — генератор ЭДС, описывающий пролетные эффекты в запирающем слое гетероперехода.

Кроме того были использованы следующие общепринятые допущения: а) смещение на диоде всегда обратное;

б) движением границ области запирающего слоя можно пренебречь, что означает как независимость сопротивления потерь диода от амплитуды колебаний, так и линейную зависимость генератора ЭДС от тока проводимости; в) обратный ток насыщения равен нулю;

г) пролетный угол в ЭСУ подчиняется условию  $\omega\tau_2 \leq 1$ , связанному с ограничением исходной модели ЭСУ.

В соответствии с эквивалентной схемой запирающего слоя ЛПД (рис. 2) электронный к. п. д.  $\eta_{эл.}$ , характеризующий мощность  $P_{эл.}$ , выделяющуюся в области запирающего слоя, равен [4]

$$\eta_{эл.} = \frac{1}{2} \omega C \operatorname{Re} Z \cdot Y_1(K) K \cdot \cos \alpha_1(K) \left[ 1 - \frac{1}{\omega\tau_2} \cdot \frac{Y_1(K)}{\cos \alpha_1(K)} \cdot \frac{1}{Km^{1/n}} \cdot \frac{\tau_2 J_o}{CU_{np.}} \right] - \frac{1}{2} Y_1(K) K \cdot \sin \alpha_1(K) (1 + \omega C \operatorname{Im} Z), \quad (11)$$

где  $\operatorname{Re} Z$ ,  $\operatorname{Im} Z$  — действительная и мнимая части импеданса генератора ЭДС;  $\tau_2$  — время пролета носителей через половину ширины ЭСУ;  $K = \bar{U}_{AB}/U_{AB}$  —

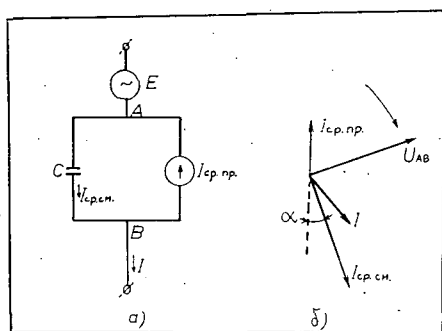


Рис. 2. Эквивалентная схема запирающего слоя ЛПД (а) и векторная диаграмма токов в этом слое (б)

приведенная амплитуда переменной составляющей напряжения;  $\bar{U}_{AB}$  — постоянная составляющая напряжения, действующего на границах ЭСУ в условиях обеднения;

$Y_1(K) = I_{cr. np.} / I_0$  — приведенная амплитуда первой гармоники среднего тока проводимости;

$I_0$  — постоянная составляющая среднего тока проводимости, величина которой произвольно задается и определяет режим работы ЛПД;

$\alpha_1(K)$  — фаза первой гармоники среднего тока проводимости;

$U_{np.}$  — напряжение пробоя при токе  $I_0$  и в отсутствие генерации;

$n=5,45$  — показатель степенной зависимости коэффициента ударной ионизации носителей в германии от поля [6];

$m = (\bar{U}_{AB} / U_{np.})^n$  — приведенная постоянная составляющая напряжения;

$\omega$  — круговая частота.

Для двухслойной структуры ЛПД на основе гетероперехода Ge—GaAs с однородным распределением электрического поля в слое умножения выражения для импеданса генератора ЭДС можно представить в виде

$$\operatorname{Re} Z = \varphi_2 / \omega C_2, \quad (12)$$

$$\operatorname{Im} Z = \psi_1 / 3\omega C_1 + \psi_2 / \omega C_2, \quad (13)$$

где

$$\varphi_2 = (1 - \cos \xi_2) / \xi_2, \quad (14)$$

$$\psi_{1,2} = (\sin \xi_{1,2} - \xi_{1,2}) / \xi_{1,2}, \quad (15)$$

$$\xi_1 = \omega \tau_\lambda / 2 = \omega \tau_1 / 6, \quad (16)$$

$$\xi_2 = \omega \tau_2, \quad (17)$$

$C_1$  и  $C_2$  — составляющие полной ёмкости запирающего слоя;  $\tau_1$  — время пролета носителей через Ge — область запирающего слоя;  $\tau_2$  — время пролета носителей через GaAs — область запирающего слоя.

Для определения зависимостей  $y_1(K)$  и  $\alpha_1(K)$  было проведено решение уравнения лавины [5]

$$\varphi_n[U_{AB}(t)] = 1 + \tau_\lambda \frac{I_{cr. np.}(t - \tau_\gamma)}{I_{cr. np.}(t)} - \frac{I_{обр.}}{I_{cr. np.}(t)}. \quad (18)$$

В соответствии с моделью ЭСУ были определены параметры  $\tau_\lambda$  и  $\tau_\gamma$  и зависимость полного умножения  $\varphi_n$  от напряжения на запирающем слое в условиях обеднения. Для рассматриваемой двухслойной структуры запирающего слоя ЛПД на гетеропереходе Ge—GaAs с однородным распределением электрического поля в слое умножения указанные зависимости имеют вид

$$\varphi_n(U_{AB}) = (U_{AB} / U_{np.})^n, \quad (19)$$

$$\tau_\lambda = 1/3\tau_1, \quad (20)$$

$$\tau_\gamma = -0,2\tau_\lambda. \quad (21)$$

Уравнение лавины было решено численным методом на ЭВМ в предположении  $I_{обр.}=0$ , поскольку в рабочем режиме ЛПД отношение  $I_{обр.}$  к рабочему току  $I_o$  достигает величин  $10^{-4}-10^{-5}$ . Результат решения уравнения лавины (18) при гармоническом напряжении, действующем на границах ЭСУ в условиях обеднения

$$U_{AB}(t) = \bar{U}_{AB}(1 + K \sin \omega t) \quad (22)$$

с учетом выражений (19—21) представлен на рис. 3.

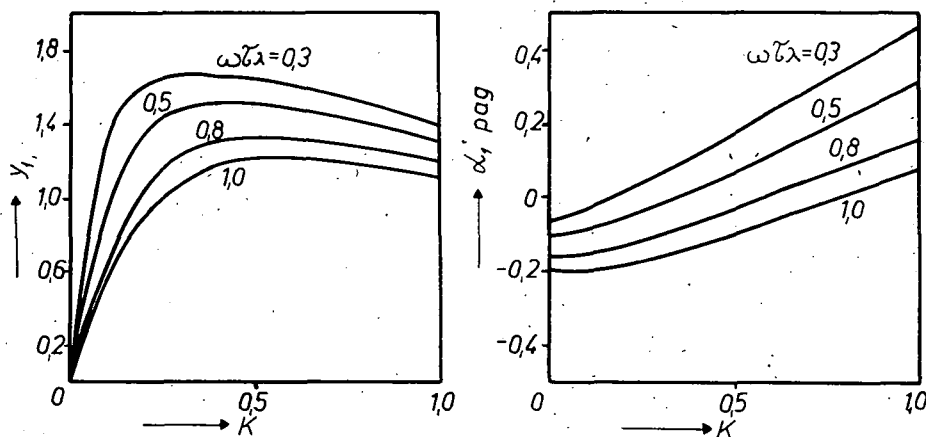


Рис. 3. Зависимость амплитуды  $Y_1$  и её фазы  $\alpha_1$  от амплитуды напряжения  $K$  в диапазоне пролетных углов.

Уравнение (11) с учетом выражений (12—17) вместе с результатами решения уравнения лавины позволяет рассчитать электронный к. п. д.  $\eta_{эл.}$  в зависимости от сочетания параметров  $K$ ,  $\omega\tau_\lambda$ ,  $\tau_\lambda I_o / CU_{np.}$ ,  $\xi_2$ . На рис. 4 представлены зависимости максимального электронного к. п. д.  $\eta_{эл. макс.}$ , определяемого максимумом функции  $\eta_{эл.}(K)$ , от пролетного угла в ЭСУ  $\omega\tau_\lambda$ , приведенного тока  $\tau_\lambda I_o / CU_{np.}$  и угла пролета  $\xi_2$  в GaAs — области запирающего слоя.

Для расчета мощности  $P_n$ , отдаваемой в нагрузку, воспользуемся эквивалентной схемой генератора на ЛПД (ГЛПД) (рис. 5), отличающейся от эквивалентной схемы запирающего слоя ЛПД (рис. 2) включением сопротивления потерь диода  $R_s$  и сопротивления нагрузки  $Z_n$ , описывающий корпус диода и внешнюю цепь, присоединенную к диоду. В соответствии с рис. 5 выражение для нагрузочного к. п. д. генератора  $\eta_n$ , работающего на согласованную нагрузку, можно представить в виде [4]

$$\eta_n = \eta_{эл.} - \frac{1}{2} (\omega\tau_\lambda)^2 \frac{K^2 m^{1/n}}{\tau_\lambda I_o / CU_{np.}} \left[ 1 - \frac{Y_1(K)}{\omega\tau_\lambda} \cdot \frac{\tau_\lambda I_o}{CU_{np.}} \cdot \frac{1}{Km^{1/n}} \right]^2 \frac{\tau_s}{\tau_\lambda} \quad (23)$$

На рис. 6 приведены зависимости максимального к. п. д.  $\eta_{н. макс.}$ , соответствующий максимальной мощности, отдаваемой в нагрузку диодом с потерями, от приведенного тока  $\tau_\lambda I_o / CU_{np.}$  для различных значений  $\omega\tau_\lambda$ ,  $\xi_2$ ,  $\tau_s / \tau_\lambda$ . На рис. 7

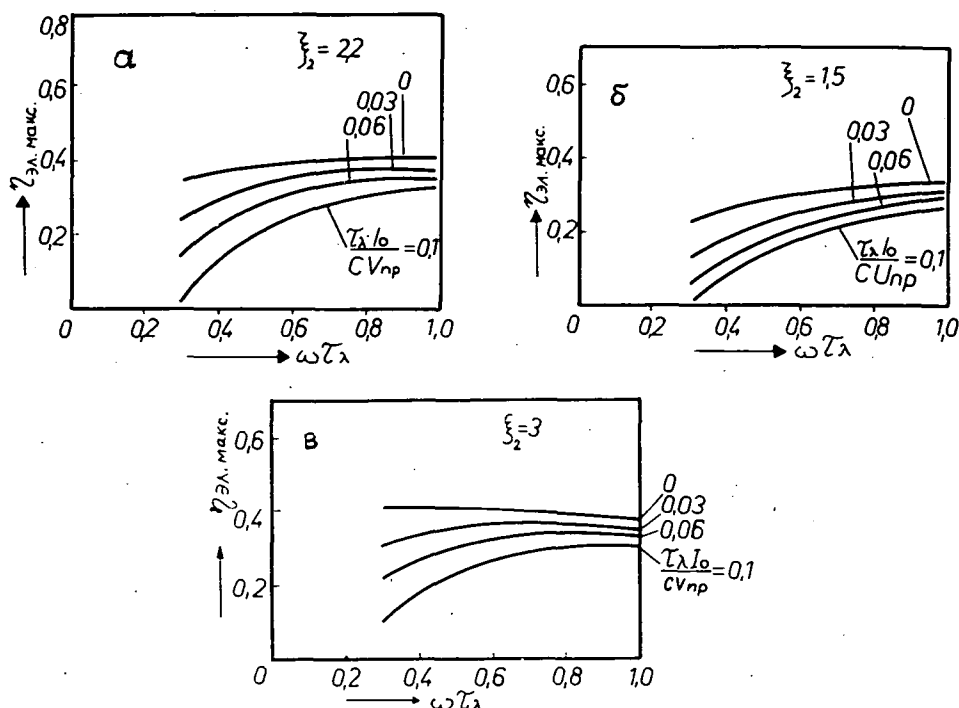


Рис. 4. Зависимость максимального электронного к. п. д.  $\eta_{эл. макс.}$  от угла пролета  $\omega\tau_\lambda$ , приведенного тока  $\tau_\lambda I_0 / CU_{пр.}$  и  $\xi_2$ :

а —  $\xi_2 = 2,2$ ; б —  $\xi_2 = 1,5$ ; в —  $\xi_2 = 3$ .

для сравнения приведены аналогичные зависимости для германиевого ЛПД с  $p-i-n$  структурой, полученные из этих же уравнений при  $\xi_1 = 0$ .

Полученные результаты позволяют проанализировать влияние различных параметров ЛПД на гетеропереходе Ge—GaAs с однородным распределением электрического поля в слое умножения на к. п. д. или мощность, отдаваемую в нагрузку генератором, а также определить необходимый набор параметров ЛПД, обеспечивающий требуемые к. п. д. или мощность генерации и оптимальную нагрузку. Анализ результатов, представленных на рис. 4—7, показывает, что по к. п. д. и, следовательно мощности, отдаваемой в нагрузку, ЛПД на гетеропереходе Ge—GaAs с однородным распределением электрического поля в слое умножения более чем на порядок превосходят германиевые ЛПД с  $p-i-n$  структурой. Вместе с тем максимальные значения электронного к. п. д. ЛПД с рассматриваемой двухслойной структурой запирающего слоя не достигают

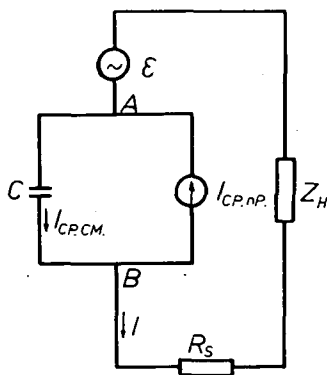


Рис. 5. Эквивалентная схема генератора на ЛПД.

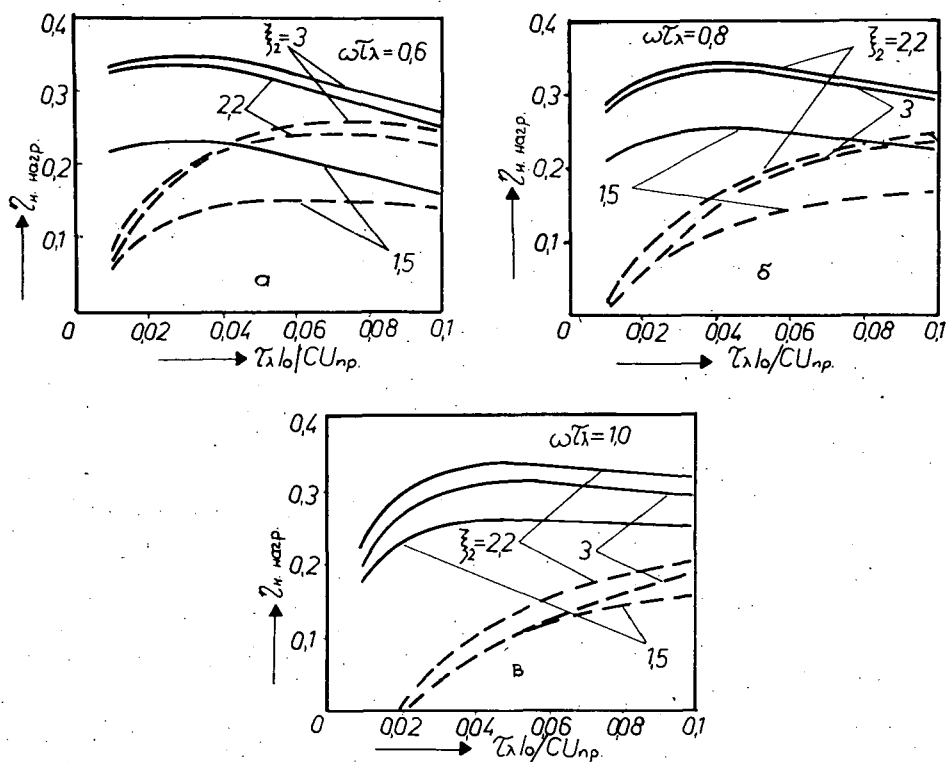


Рис. 6. Зависимость максимального к. п. д.  $\eta_{н. макс.}$  от приведенного тока  $\tau_{\lambda} I_0 / CU_{нр.}$ , угла пролета  $\xi_2$ , величины потерь  $\tau_s/\tau_{\lambda}$  и угла пролета  $\omega\tau_{\lambda}$ :

а —  $\omega\tau_{\lambda} = 0,6$ ; б —  $\omega\tau_{\lambda} = 0,8$ ; в —  $\omega\tau_{\lambda} = 1$ ; —  $\tau_s/\tau_{\lambda} = 0,005$ ; ---  $\tau_s/\tau_{\lambda} = 0,05$

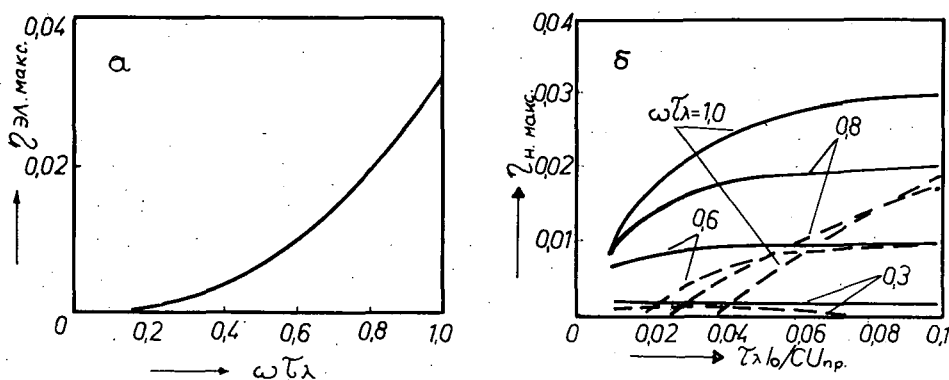


Рис. 7. Зависимости максимальный электронный  $\eta_{эл. макс.}$  (а) и нагрузочного  $\eta_{н. макс.}$  (б) к. п. д. для германиевого ЛПД с  $p-i-n$  структурой:

—  $\tau_s/\tau_{\lambda} = 0,005$ ; ---  $\tau_s/\tau_{\lambda} = 0,05$ .

70% [7], а ограничиваются значениями 40%. Это связано с тем, что оценка максимальной эффективности ЛПД с двухслойным запирающим слоем [7] была проведена без учета фазового сдвига между амплитудой первой гармоники среднего тока проводимости и амплитудой напряжения и зависимости его от последней. В то же время проведенный расчет подтвердил преимущества использования двухслойной структуры запирающего слоя в ЛПД и позволил оценить перспективы использования гетеропереходов в ЛПД.

Результаты настоящей работы, приведенные на графиках 3—4, 6 совместно с данными работы [2] позволяют определить необходимый набор параметров ЛПД и двухслойной структуры запирающего слоя на основе гетероперехода Ge—GaAs с однородным распределением электрического поля в слое умножения, обеспечивающий требуемые к. п. д. или мощность генерации и оптимальную нагрузку.

Анализ перспектив использования гетеропереходов в ЛПД позволяет сделать вывод о том, что для дальнейшего повышения к. п. д. ЛПД целесообразно использовать трёхслойную структуру запирающего слоя с двумя пролетными пространствами (материалы с высокой пробивной напряженностью электрического поля) по обе стороны от слоя умножения (материал с низкой пробивной напряженностью электрического поля). Такая структура, например, на основе  $(p^+ - p)\text{GaAs} - n\text{Ge} - (n - n^+)\text{GaAs}$  позволяет повысить эффективность лавиннопролетного диода до 60—65%. Предварительные расчеты показывают, что указанная эффективность ЛПД может быть достигнута при условии, что бо́льшину двух высокоомных слоев, в которых сосредоточен пролет носителей, тудут одинаковыми. Результаты детального анализа параметров ЛПД на основе таких структур будут представлены к печати позднее.

### Выводы

1. Проведено решение уравнения лавины для двухслойной структуры запирающего слоя ЛПД на основе гетероперехода Ge—GaAs с однородным распределением электрического поля в слое умножения, позволившее определить амплитуду и фазу первой гармоники среднего тока проводимости.

2. Проведен расчет электронного и нагрузочного к. п. д. ЛПД с двухслойным запирающим слоем, позволяющий определить необходимый набор параметров ЛПД и двухслойной структуры запирающего слоя гетероперехода Ge—GaAs, обеспечивающий требуемые к. п. д. или мощность генерации и оптимальную нагрузку.

3. Предложена трёхслойная структура запирающего слоя ЛПД, позволяющая повысить максимальный к. п. д. до 60—65%.

\* \* \*

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории полупроводников Института экспериментальной физики АН ВНР за помощь в работе.



## Литература

- [1] Датиев, К. М., И. М. Мартиросов, Я. А. Федотов: Электронная техника, сер. 2 6, 35 (1970).
- [2] Федотов, Я. А., К. М. Датиев: Электронная техника, сер. 2 6, 3 (1971).
- [3] Датиев К. М.: Acta Phys. et Chem. Szeged 23, 000 (1977).
- [4] Федотов, Я. А., К. М. Датиев: Электронная техника, сер. 2 3, 3 (1976).
- [5] Захаров, А. Л., И. М. Мартиросов: ФТП 1, 1777 (1967).
- [6] Шотов, А. П.: ЖТФ 28, 437 (1958).
- [7] Вальд-Перлов, В. М., И. М. Мартиросов, А. С. Тагер: Авт. Свид. СССР № 245 922, БИ 20 (1969).

## NUMERICAL ANALYSIS OF Ge—GaAs IMPATT DIODES

*K. M. Datiev*

Calculation of generation power was done for the case of homogenous field distribution in the multiplication region of Ge—GaAs IMPATT diodes. The obtained data made possible to determine the generation efficiency and the optimum load.